

УДК 662.9(083)

А. Б. БИРЮКОВ, канд. техн. наук, доцент

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

## АНАЛИЗ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА ПРИ НАГРЕВЕ МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ

*Для мероприятий, нацеленных на сокращение расхода топлива при реализации операций тепловой обработки заготовок в печах за счет повышения значения коэффициента использования топлива, разработаны функциональные зависимости, позволяющие определять величину управляющего воздействия в зависимости от требуемого уровня относительной экономии топлива. Данный научно-практический инструментарий позволяет целенаправленно реализовывать реконструкцию печных агрегатов и оценивать реальность предложений сторонних организаций.*

*Для заходів, що націлені на скорочення витрати палива на реалізацію операцій теплової обробки заготовок в печах за рахунок збільшення коефіцієнта використання палива, розроблено функціональні залежності, які дозволяють визначати величину керуючого впливу в залежності від заданого рівня відносної економії палива. Цей науково-практичний інструментарій дозволяє цілеспрямовано реалізовувати реконструкцію пічних агрегатів і оцінювати реальність пропозицій сторонніх організацій.*

В структуре затрат топливно-энергетических ресурсов металлургических предприятий значительный вес имеют затраты топлива на реализацию операций тепловой обработки заготовок (нагрев под прокатку и термообработка) в печах непрерывного и периодического действия. Для украинской металлургии задача существенного снижения расхода газообразного топлива на реализацию операций тепловой обработки металла является одной из наиболее актуальных [1].

### Анализ публикаций по теме исследования

Для анализа эффективности тепловой работы нагревательных печей принято использовать величины коэффициента полезного действия, который представляет собой долю энергии топлива, поступившей в агрегат извне, усвоенной нагреваемым материалом, и коэффициента использования топлива, соответствующего доле энергии, оставленной в рабочей камере (эта энергия идет на нагрев материала и покрытие теплопотерь рабочей камеры). Чаше используют величину коэффициента использования топлива. Различают текущие и средние за процесс нагрева значения коэффициента использования топлива [1, 2].

Для случая поступления в агрегат холодного газа вычисление текущего значения коэффициента использования топлива можно провести по следующей зависимости [3]:

$$\eta = \frac{Q_H^p - V_{yx} \cdot c^{t_{yx}} \cdot t_{yx} \cdot (1 - k_r)}{Q_H^p}, \quad (1)$$

где  $Q_H^p$  – теплота сгорания топлива, Дж/м<sup>3</sup>;

$V_{yx}$  – количество продуктов сгорания, покидающих рабочую камеру печи и приходящееся на единицу топлива (при отсутствии присосов численно равно выходу продуктов сгорания с 1 м<sup>3</sup> топлива при заданном значении коэффициента расхода воздуха), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$c^{t_{yx}}$  – средняя теплоемкость продуктов сгорания, покидающих рабочую камеру, при их температуре, Дж/(м<sup>3</sup>·К);

$t_{yx}$  – температура продуктов сгорания, покидающих рабочую камеру, °С;

$k_r$  – коэффициент рекуперации (доля теплоты уходящих из рабочей камеры продуктов сгорания, возвращаемая в нее с подогретым в рекуператоре воздухом, идущим на сгорание топлива, и в ряде случаев с топливом).

В качестве среднего за процесс нагрева коэффициента использования топлива для агрегата периодического действия в работе [4] предложено понимать средневзвешенное значение, которое зависит от распределения во времени текущих значений коэффициента использования топлива и тепловых потоков, падающих на поверхность материала, и определяется следующим образом:

$$\eta_{св} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta t + Q_{nom} \cdot \tau_n}{F_M \cdot \int_0^{\tau_n} \frac{q}{\eta} \cdot d\tau + \int_0^{\tau_n} \frac{Q_{nom}^m}{\eta} d\tau}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса нагреваемого материала, кг;

$c$  – средняя теплоемкость нагреваемого материала для интервала температур тепловой обработки, Дж/(кг·°C);

$\Delta t$  – требуемое повышение среднemasсовой температуры, °C;

$Q_{пот}$  – средняя мощность теплотерь рабочей камеры за период нагрева, Вт;

$Q_{пот}^T$  – текущая мощность потерь тепла рабочей камерой, Вт;

$\tau_n$  – время нагрева материала, с;

$q$  – текущее значение плотности теплового потока, падающего на поверхность материала, Вт/м<sup>2</sup>;

$\eta$  – текущее значение коэффициента использования топлива;

$F_M$  – наружная поверхность нагреваемых тел, м<sup>2</sup>.

Для печей непрерывного действия при установившемся режиме работы нет различия между текущими и средневзвешенными значениями коэффициента использования топлива и вычисления ведем по зависимости (1).

При заданных параметрах нагрева расход топлива для печи периодического действия будет определен средневзвешенным значением коэффициента использования топлива за весь период нагрева:

$$V = \frac{m \cdot c \cdot \Delta t + Q_{nom} \cdot \tau_n}{\eta_{св} \cdot Q_n^p}. \quad (3)$$

Как видно из зависимости (3), задача сокращения расхода топлива может решаться за счет повышения средневзвешенного значения коэффициента использования топлива за процесс нагрева и сокращения потерь тепла рабочей камерой.

В свою очередь из выражения (1) очевидно, что средствами повышения значения коэффициента использования топлива могут служить увеличение коэффициента рекуперации, снижение температуры продуктов сгорания, покидающих камеру печи, и сокращение их количества.

В настоящее время отсутствует общепринятая методология для оценки проектов по экономии топлива на тепловую обработку заготовок в печах за счет повышения значения коэффициента использования топлива. Поэтому при рассмотрении предложений сторонних организаций (особенно иностранных) или при разработке собственных технических решений у отечественных предприятий нет научно-практического инструмента для их предварительной оценки и последующего принятия к исполнению или отклонения.

### Постановка задачи исследования

Задачей данной работы является разработка методологии предварительного анализа эффективности проектов, нацеленных на повышение значения коэффициента использования топлива (а, значит сокращения расхода топлива) для печей периодического действия за счет повышения значения коэффициента рекуперации, сокращения количества удаляемых продуктов сгорания и снижения их температуры.

### Изложение основного материала

#### Анализ проектов по повышению значения коэффициента рекуперации

Известно, что одним из наиболее мощных рычагов повышения величины коэффициента использования топлива на современном этапе развития металлургической теплотехники является рост значения коэффициента рекуперации. Так, для теоретического случая, при котором коэффициент рекуперации равен единице, коэффициент использования топлива также равен единице независимо от температуры продуктов сгорания, покидающих рабочую камеру. По своему физическому смыслу эта величина показывает, какая доля тепла продуктов сгорания, покидающих рабочую камеру, возвращается в нее с теплом подогретых сред (воздуха, топлива или рециркулята).

Подогрев воздуха реализуется при помощи специальных теплообменных аппаратов рекуперативного или регенеративного типа. В последнее время предпочтение отдается аппаратам рекуперативного типа, в которых продукты сгорания топлива непрерывно обмениваются теплом с подогреваемым воздухом через разделительную стенку. На практике используются следующие основные виды рекуператоров: керамические, стальные гладкотрубные, игольчатые, щелевые, спиральные и т.д. У каждого из видов рекуператоров имеются особенности использования, достоинства и недостатки, что определяет сферу их использования.

В настоящее время важной задачей является установление зависимости требуемого значения коэффициента рекуперации от заданной экономии топлива по сравнению с базовым вариантом. Для решения этой задачи предложен подход, базирующийся на следующем соотношении:

$$\frac{V_{np}}{V_{баз}} = \frac{\eta_{баз}}{\eta_{np}} = \frac{Q_{нр} - V_{yx} \cdot (1 - k_{rec}^{баз}) \cdot c^{t_{yx}} \cdot t_{yx}}{Q_{нр} - V_{yx} \cdot (1 - k_{rec}^{np}) \cdot c^{t_{yx}} \cdot t_{yx}} = V_{пр}^{отн}, \quad (4)$$

где  $V_{баз}$ ,  $V_{пр}$  – расходы топлива для базового и предлагаемого режима отопления (речь может идти как о моментальных расходах, так и полных за весь период нагрева),  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$V_{пр}^{отн}$  – относительное значение расхода топлива в предложенном режиме по сравнению с базовым вариантом;

$k_{rec}^{баз}$ ,  $k_{rec}^{np}$  – коэффициенты рекуперации для базового и предлагаемого вариантов.

Зависимость (4) базируется на предположении о неизменном распределении температур продуктов сгорания в камере печи, сохранении темпа нагрева и изменения во времени величины теплотерь рабочей камеры после реконструкции по изменению значения коэффициента рекуперации.

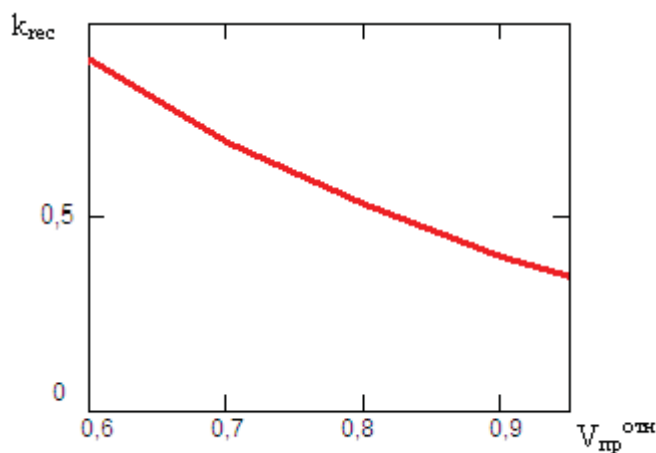


Рис. 1. Зависимость требуемого значения коэффициента рекуперации для достижения заданной экономии топлива

Следует иметь в виду, что достигаемое сокращение расхода топлива повлечет за собой снижение скоростей потоков продуктов сгорания в камере печи и некоторое снижение конвективной составляющей теплообмена. Эта ситуация может обусловить ослабление эффекта, оцененного при помощи предложенной зависимости. Однако, учитывая преобладание лучистого теплообмена для высокотемпературных агрегатов и влияние скорости течения газообразных сред на значение конвективной теплоотдачи в степени меньшей единицы, предполагается, что использование предложенной зависимости для предварительной оценки эффекта от роста коэффициента рекуперации вполне правомочно.

Пример использования данной методики для анализа конкретной задачи приведен для следующих исходных данных: в качестве топлива применяется природный газ; базовое значение коэффициента рекуперации 0,3. Определенные при помощи созданного подхода значения коэффициента рекуперации необходимые для достижения заданной экономии топлива (заданного сниженного относительного расхода топлива) показаны на рисунке 1.

Анализ представленной информации подчеркивает очевидные выводы о том, что даже для теоретического случая, когда коэффициент рекуперации и соответственно коэффициент использования топлива равны 1, предельное снижение расхода топлива имеет вполне конкретное значение. То есть ни при каких обстоятельствах расход топлива не может быть ниже того теоретического значения, при котором вся энергия, поступившая в агрегат извне, идет на заданное повышение теплосодержания материала в процессе тепловой обработки.

*Сокращение количества продуктов сгорания, покидающих печь*

В составе зависимости (1), предназначенной для определения текущих значений коэффициента использования топлива, используется количество продуктов сгорания, покидающих камеру печи, отнесенное к единице топлива. Это значение определяется удельным выходом продуктов сгорания с единицы топлива для установленного значения коэффициента расхода воздуха и уровня присосов воздуха в камеру печи. Коэффициент расхода воздуха выбирается исходя из характеристик используемых газогорелочных устройств и условия достижения полного сгорания топлива. Из зависимости (1) следует, что снижение количества продуктов сгорания, покидающих камеру печи, приводит при прочих равных условиях к росту значения коэффициента использования топлива. Для количественного анализа этой закономерности предложен подход, позволяющий определить, до какой величины должно быть снижено удельное количество продуктов сгорания, покидающих печь, чтобы при прочих равных параметрах нагрева достичь заданную экономию топлива:

$$\frac{V_{np}}{V_{баз}} = \frac{\eta_{баз}}{\eta_{np}} = \frac{Q_{нр} - V_{yx}^{баз} \cdot (1 - k_{rec}) \cdot c^{t_{yx}} \cdot t_{yx}}{Q_{нр} - V_{yx}^{np} \cdot (1 - k_{rec}) \cdot c^{t_{yx}} \cdot t_{yx}} = V_{пр}^{отн}, \quad (5)$$

где  $V_{yx}^{баз}$ ,  $V_{yx}^{np}$  – удельный выход продуктов сгорания в базовом и предлагаемом режимах,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$k_{rec}$  – коэффициент рекуперации для рассматриваемой технологии нагрева.

Предложенная зависимость (5) представляет собой упрощенный подход, не учитывающий изменение значения коэффициента рекуперации при уменьшении расхода топлива, связанном со снижением количества уходящих газов. При этом вносится погрешность, однако ее величина не является значительной, так как речь идет о сравнительно небольших изменениях расхода топлива и, соответственно, расходов теплообменивающихся сред и незначительном росте значения коэффициента рекуперации согласно динамической тепловой характеристике рекуператора [4]. Темп нагрева материала и мощность теплотерь рабочей камеры приняты неизменными для базового и предлагаемого экономного режимов.

При помощи зависимости (5) проведен анализ влияния снижения удельного количества продуктов сгорания, покидающих агрегат, на достигаемый уровень экономии топлива. В качестве расчетной температуры выхода продуктов сгорания из печи принято значение

1200 °С; теплота сгорания природного газа – 35800 кДж/м<sup>3</sup>; значение коэффициента рекуперации – 0,3; удельный выход продуктов сгорания в базовом режиме 12 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Полученные результаты представлены на рис. 2. При их анализе необходимо иметь в виду, что реальное значение удельного выхода продуктов сгорания не может быть ниже стехиометрического выхода продуктов сгорания с единицы топлива, а конкретное значение коэффициента расхода воздуха, конструкция газогорелочных устройств и технология сжигания должны обеспечить полное сгорание топлива. Анализ представленных результатов (рис. 2) свидетельствует о том, что в рамках рассматриваемого примера максимально возможная экономия топлива за счет снижения количества продуктов сгорания, покидающих камеру печи, составляет не более 5%. Для достижения такой экономии необходимо установление значения коэффициента расхода воздуха на уровне примерно 1,05. Переход на такие значения предъявляет особо высокие требования к работе газогорелочных устройств, на практике для реализации такой экономии может потребоваться замена применявшихся горелок. Однако необходимо иметь в виду, что особо качественное предварительное смешение топлива и воздуха может привести к снижению светимости факела и нивелировать достигнутый результат при сокращении расхода уходящих газов за счет повышения их температуры.

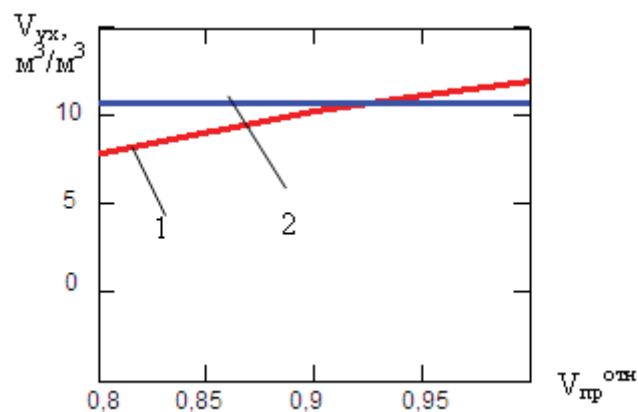


Рис. 2. Зависимость требуемого значения удельного количества уходящих продуктов сгорания от заданного уровня экономии топлива (1- полученная расчетная кривая; 2 – минимально возможный для принятого вида топлива выход продуктов сгорания, соответствующий  $\alpha=1$ )

*Исследование влияния снижения температуры уходящих продуктов сгорания на значение коэффициента использования топлива*

Из выражения (1) следует, что снижение температуры уходящих продуктов сгорания при прочих равных условиях позволяет повысить величину коэффициента использования топлива и, следовательно, сократить расход топлива. Снижение температуры уходящих газов без принятия специальных мер по интенсификации теплообмена в печи приведет к удлинению операций тепловой обработки и росту окисления.

В данном пункте решается вопрос о том, какой именно должна быть величина температуры уходящих газов для достижения заданного уровня экономии топлива при сохранении производительности агрегата. Вопрос о том, как сохранить тепловую производительность агрегата неизменной и в каких пределах это возможно, рассмотрен в работе [4]:

Для этой цели предложено соотношение:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{Q_{нр} - V_{ух} \cdot k_r(V_1, F) \cdot c_{ух}(t_{1ух}) \cdot t_{1ух}}{Q_{нр} - V_{ух} \cdot k_r(V_2, F) \cdot c_{ух}(t_{2ух}) \cdot t_{2ух}}, \quad (6)$$

где  $V_1$ ,  $V_2$  – расходы топлива по базовому и предлагаемому режимам отопления, м<sup>3</sup>/с;



$k_r(V, F)$  – зависимость коэффициента рекуперации от расхода топлива (и соответственно расходов воздуха и продуктов сгорания) и поверхности теплообмена рекуператора [4];

$t_{1yx}, t_{2yx}$  – температуры продуктов сгорания, покидающих печь при базовом и предлагаемом режимах, °С.

При составлении выражения (6) использовано предположение, согласно которому мощность теплопотерь рабочей камеры остается неизменной. Такой подход позволил получить простую расчетную зависимость для анализа влияния снижения температуры уходящих продуктов сгорания на расход топлива и значение коэффициента использования топлива. Однако нужно иметь в виду, что в действительности имеем две противоположные тенденции, которые могут повлиять на величину теплопотерь рабочей камеры: снижение температуры продуктов сгорания, заполняющих камеру печи, определяет снижение потенциала теплопотерь; с другой стороны интенсификация теплообмена в камере печи, нацеленная на сохранение темпа нагрева материала, должна привести к росту теплопотерь.

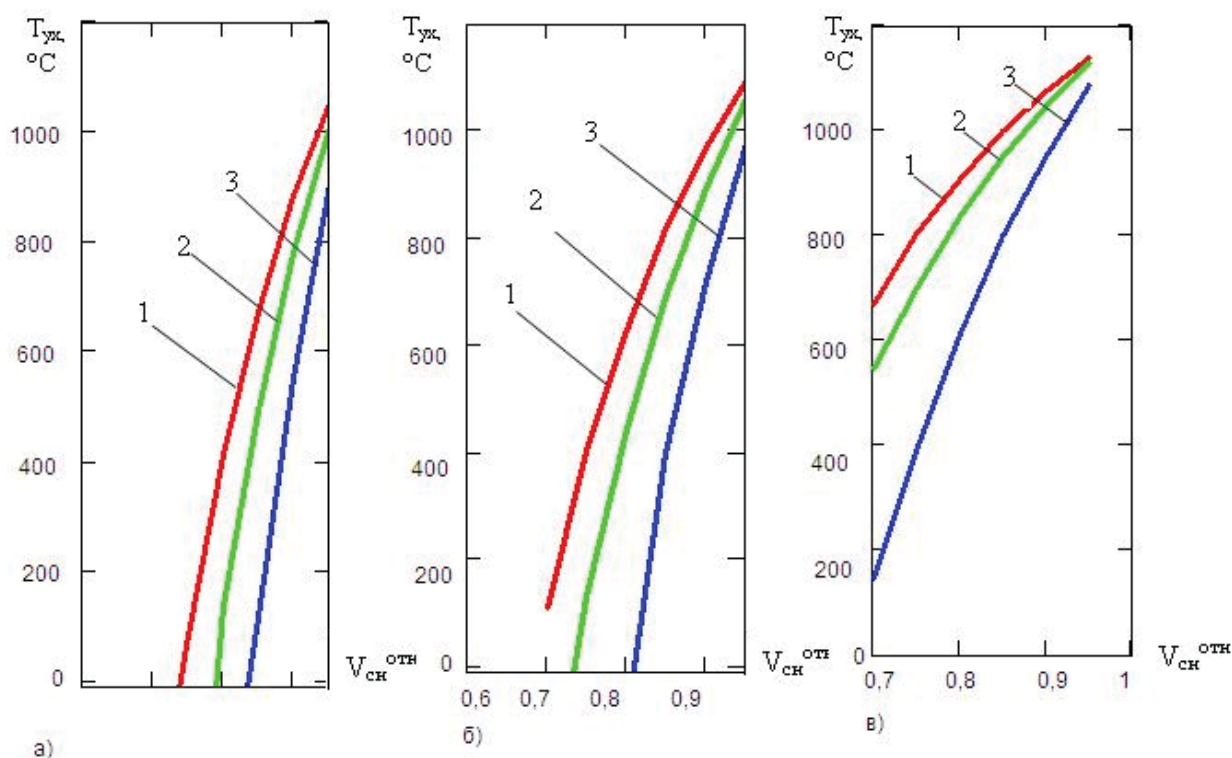


Рис. 3. Требуемое снижение температуры для достижения заданной экономии топлива при сохранении неизменной производительности (а – при поверхности рекуператора 500 м², б – 300 м², в – 100 м²; 1 – при расходе топлива 0,5 м³/с, 2 – 0,3 м³/с, 3 – 0,1 м³/с)

Предложенная зависимость (6) дает возможность для произвольного момента работы по базовому режиму нагрева вычислить требуемое значение температуры уходящих газов, переход на которое позволил бы достичь заданный уровень моментальной экономии топлива.

Для расчетов при помощи зависимости (6) задаем расход топлива  $V_2$ , соответствующий заданному уровню экономии топлива и находим величину  $t_{2yx}$ . Использование зависимости (6) позволило получить результаты, представленные на рис. 3. В качестве базового значения температуры уходящих продуктов сгорания принято значение 1200°С. Рассмотрено три случая с условно выбранными керамическими рекуператорами площадью поверхности нагрева 500, 300 и 100 м² и в зависимости (6) использованы их динамические тепловые характеристики [4]. Анализ данных приводит к выводу о том, что снижение температуры

уходящих продуктов сгорания как отдельное мероприятие вряд ли позволит достичь экономии топлива более 10-15%.

Также совместное рассмотрение комплекса информации, представленного на рис. 3, позволяет заключить, что эффект роста значения коэффициента использования топлива и соответственно сокращения расхода топлива только за счет снижения температуры уходящих газов в относительном выражении, при прочих равных условиях, легче достигается для больших расходов топлива и меньших значений коэффициента рекуперации.

### Выводы

Созданы методы для анализа энергоэффективности различных проектов по повышению уровня ресурсоэнергосбережения при нагреве металла в печах. В качестве мероприятий, позволяющих улучшить технико-экономические показатели нагрева, рассмотрены: повышение значения коэффициента рекуперации; сокращение количества уходящих продуктов сгорания; снижение температуры уходящих продуктов сгорания при сохранении темпа нагрева металла за счет повышения интенсивности теплообмена в камере печи.

Для каждого из рассматриваемых мероприятий разработана функциональная зависимость, позволяющая определить величину управляющего воздействия в зависимости от требуемого уровня относительной экономии топлива. Данный научно-практический инструментарий позволяет целенаправленно реализовывать реконструкцию печных агрегатов и оценивать реальность предложений сторонних организаций.

### Список литературы

1. Губинский В. И. Нагревательные печи металлургии – сегодня и завтра / В. И. Губинский // Теория и практика металлургии. – 2004. – № 6. – С. 56–60.
2. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали / Н. Ю. Тайц. – М.: Металлургия, 1962. – 568 с.
3. Румянцев В. Д., Ольшанский В. М. Теплотехника: учебное пособие / В. Д. Румянцев, В. М. Ольшанский; под. ред. В. И. Губинского. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 325 с.
4. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах / А. Б. Бирюков. – Донецк: Ноулидж, 2012. – 250 с.

### ANALYSIS OF MEASURES TO IMPROVE FUEL EFFICIENCY VALUES IN HEATING OF METAL IN FURNACES

A. B. BIRUKOV, Candidate of Engineering, Associate Professor

*The paper gives functional dependencies developed to allow determining control magnitude depending on required level of relative fuel saving for measures aimed at reduction of fuel consumption in heat treatment of work pieces in furnaces by increasing fuel efficiency value. This theoretical and practical tools allow goal-oriented reconstruction of furnace units and assess the feasibility of proposals by third-party organizations.*

Поступила в редакцию 24.09 2013 г.